



JANUSZ HOŁOWATY¹⁾
BERNARD WICHTOWSKI²⁾

PROPERTIES OF STEEL IN RAILWAY BRIDGE CONSTRUCTED IN 1887

WŁAŚCIWOŚCI STALI MOSTU KOLEJOWEGO WYBUDOWANEGO W 1887 ROKU

STRESZCZENIE. W eksploatacji znajduje się jeszcze wiele stalowych mostów kolejowych wybudowanych w drugiej połowie XIX wieku. Parametry mechaniczne i metalurgiczne stali w tych mostach oraz ich trwałość nie są dobrze rozpoznane, mogą się też między sobą znacznie różnić. Przedstawiono analizę właściwości mechanicznych oraz sposób wyznaczenia aktualnej wytrzymałości obliczeniowej dla blachownicowego mostu kolejowego, będącego w eksploatacji od prawie 130 lat. Badania wykonano na próbkach materiału stali konstrukcyjnej pobranych ze zdemontowanych podłużnic pomostu belkowego, które utraciły swoją przydatność użytkową na skutek rozległych uszkodzeń korozyjnych. Rozpoznanie gatunku i jakości stali konstrukcyjnej umożliwiło opracowanie projektu remontu obiektu oraz zachowanie go w dalszej eksploatacji. Przedstawiona metodyka postępowania może być przydatna przy modernizacji i remontach starych mostów kolejowych.

SŁOWA KLUCZOWE: most kolejowy, skład chemiczny, spawalność, stal zlewna, starzenie konstrukcji, starzenie stali, właściwości mechaniczne.

ABSTRACT. A number of 19th century steel railroad bridges are still in operation. Mechanical and metallurgical properties of steel in such bridges, and also its durability, have not been sufficiently studied, and these can vary considerably. This paper presents the results of analysis of mechanical parameters as well as the method used to determine the design strength of a plate girder railway bridge, which has been in operation for almost 130 years. The tests were carried out on the structural steel samples cut from dismantled floor stringers in end-of-life condition due to extensive corrosion. The grade and quality of the structural steel were determined and used in the design of the bridge repair project in order to keep it in operation. The method of steel evaluation as presented in this paper can be applied in other repairs and retrofitting of old railway bridges.

KEYWORDS: ageing of steel, cast steel, chemical composition, infrastructure ageing, mechanical properties, railroad bridge, weldability.

DOI: 10.7409/rabdim.015.018

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury; janusz.holowaty@zut.edu.pl ✉

²⁾ emerytowany profesor Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie; marek.wichtowski@zut.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Zgodnie z normą Eurokod 3 wymaga się, żeby każda konstrukcja była zaprojektowana i wykonana w taki sposób, aby w zamierzonym okresie użytkowania zapewniona była jej nośność, użyteczność i trwałość [1]. Norma podaje także orientacyjne projektowe okresy użytkowania, które dla mostów (kategoria nr 5) określa się na 100 lat. Normy wyrobów hutniczych wymagają na ogół, aby praca potrzebna do złamania próbki uderzeniowej z karbem ostrym Charpy V w określonej temperaturze badania nie była niższa niż 27 J. Wymóg ten dotyczy jednak nowych konstrukcji spawanych, projektowanych ze współczesnych stali konstrukcyjnych o wysokich parametrach uderzeniowości i uwzględnia zachowanie odporności materiału na kruche pękanie przez cały przewidywany okres eksploatacji.

Duża liczba konstrukcji mostowych w Polsce osiągnęła zakładaną trwałość lub zbliża się do końca przyjmowanego okresu użytkowania. Problem ten dotyczy w szczególności kolejowych obiektów mostowych [2-4]. Ponad 75% z nich liczy ponad 50 lat, z czego prawie 45% jest eksploatowanych od ponad 100 lat, czyli już przekroczyło zakładaną obecnie trwałość. W powyższym zestawieniu udział stalowych obiektów kolejowych stanowi 42%. Istniejąca sytuacja wymaga prowadzenia systematycznej kontroli i oceny stanu technicznego oraz przydatności użytkowej konstrukcji mostowych. Uszkodzenia obiektów mostowych stanowią wynik działania procesów degradacji. Są to zjawiska związane z eksploatacją i starzeniem się samej konstrukcji technicznej, jak również jej materiału. Zagadnienie to przedstawiono w odniesieniu do stali wbudowanych w stare mosty, m.in. w pracach [5-12].

Opracowanie projektu remontu obiektu stalowego, będącego w użytku od dłuższego czasu, wymaga rozpoznania gatunku i jakości stali konstrukcyjnej w celu oszacowania właściwości mechanicznych oraz wyznaczenia aktualnej wytrzymałości obliczeniowej [13]. W przypadku prac naprawczych lub wzmocnienia konstrukcji należy określić możliwość zastosowania spawania [14]. Tak określone parametry zostają wykorzystane w projekcie remontu obiektu, a uzyskane wyniki mogą być przydatne przy restytucji analogicznych konstrukcji.

Przedstawione zagadnienia są szczególnie istotne w przypadku starych mostów kolejowych, gdyż zastosowane w nich wczesne stale konstrukcyjne i ich właściwości nie są znane większości inżynierów zajmujących się utrzymaniem, naprawą i kontrolą istniejących mostów. Prawidłowe rozpoznanie specyficznych właściwości starych materiałów jest podstawowym wymaganiami do ich właściwej

1. INTRODUCTION

Eurocode 3 requires that steel structures must be designed and constructed to meet the load-bearing capacity, serviceability and durability requirements during the planned service life [1]. The standard gives reference values of the design working life of different structures, which in case of bridges (category No. 5) is estimated for 100 years. When it comes to steel mill products, the standards generally require the minimum impact energy of 27 J measured on Charpy V-notch specimens at a specified test temperature. This requirement, however, applies to newly-built welded structures, the design of which specifies the contemporary structural steel featuring high impact toughness and assumes fracture toughness through the whole service life of the structure.

A large number of bridges located in Poland have either reached or are close to reaching the end of the design working life. This problem applies in particular to the railway bridges [2-4]. Over 75% of them are more than 50 years old, 45% of which have been in operation for over a hundred years, thus exceeding the estimated design working life. In the above compilation the steel bridges constitute 42%. Their condition requires regular inspections, evaluation and assessment of serviceability of their structures. The existing damage results from gradual deterioration which includes processes related to operation and ageing of both the structure and the material of which it is composed. This problem, in relation to the steel incorporated in old bridges, was presented in [5-12], among others.

A retrofitting design of a steel bridge, which has been in operation for a long time, requires determination of the grade and quality of structural steel in order to estimate its mechanical properties and to determine the current yield strength [13]. The design of repairs or strengthening should include assessing the suitability of the structure for welding [14]. The above defined parameters were used in the bridge retrofitting design and the results can be useful in upgrading similar structures.

The issues presented in this paper are particularly relevant to old railway bridges because of their specific material, that is early structural steel, the properties of which are not known to most engineers involved in maintenance, repair and inspection of such existing bridges. Accurate determination of the specific properties of old materials is critical to their correct evaluation and repair or retrofitting of the whole structure.

oceny i przyjęcia odpowiedniego sposobu naprawy lub modernizacji konstrukcji.

2. KONSTRUKCJA MOSTU

Dwuprzęsłowy blachownicowy most kolejowy z jezdnią dolną jest usytuowany na trzytorowym odcinku (w stacji) linii kolejowej (Rys. 1-4). Most o konstrukcji nitowanej został zbudowany dla kolei niemieckiej i oddany do eksploatacji w roku 1887. Jest on usytuowany nad rzeką Obrą, na linii kolejowej nr 367 Zbąszynek-Gorzów Wielkopolski. Konstrukcję nośną przęsła stanowią dwa swobodnie podparte dźwigary blachownicowe o rozpiętości teoretycznej 24,64 m i rozstawie poprzecznym 4,40 m. Środnik o stałej wysokości na długości mostu ma przekrój 2100×14 mm, a pasy charakteryzują się przekrojem 340×15 mm w strefach przypodporowych i są wzmocnione w strefie środkowej trzema nakładkami, każda o analogicznym przekroju 340×15 mm. Pasy ze środnikiem łączą dwa kątowniki 140×140×15 mm.

2. BRIDGE STRUCTURAL DESCRIPTION

The bridge under analysis is a two-span semi-through plate girder system located on a triple-track section within railway station area (Fig. 1-4). It was a German railway project, opened in 1887, in which riveted connections were used to assemble the parts. The bridge provides a railway crossing of the Odra river for railway line No. 367, between Zbąszynek and Gorzów Wielkopolski. The load-bearing structure consists of two simply supported steel plate girders with 24.64 m span between centres of supports, spaced at 4.40 m between centres. The web has a constant height along the bridge length and 2100×14 mm cross-section. The cross-section of flanges is 340×15 mm at supports and in the middle they are strengthened with three cover plates of the same cross-section. The flanges are connected to the web with two 140×140×15 mm steel angles.

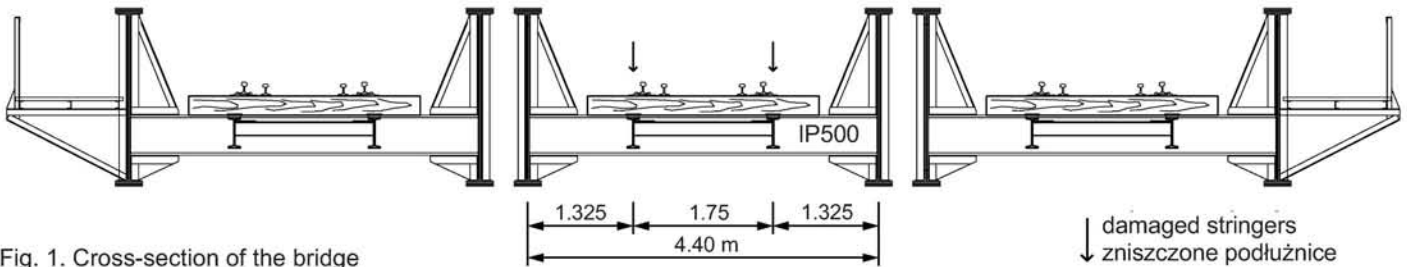


Fig. 1. Cross-section of the bridge
Rys. 1. Przekrój poprzeczny mostu

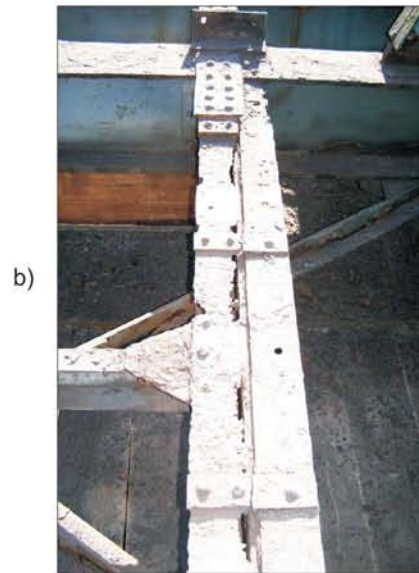


Fig. 2. Corroded beam floor: a) general view, b) corroded top flange of a stringer
Rys. 2. Skorodowany pomost belkowy: a) widok ogólny, b) skorodowany pas górny podłużnicy

Konstrukcję nośną pomostu belkowego przęseł stanowią podłużnice w rozstawie 1,75 m, połączone z poprzecznicami w odstępach co 3,08 m (Rys. 1 i 2). Belki pomostu wykonane są z profili walcowanych. Podłużnice zostały wykonane z dwuteowników NP 360 w strefach przypodporowych (na długości 9,24 m) oraz z INP 380 w strefie środkowej (na długości 6,16 m). Poprzecznice wykonane są z dwuteowników Peiner IP 500. Nawierzchnia kolejowa mostu była tradycyjna na mostownicach opartych bezpośrednio na półkach górnych podłużnic. Sztywność przestrzenną mostu zapewniają półramy sprężyste, poziome stężenie wiatrowe typu X z kątowników 70×70×10 mm w płaszczyźnie pasów dolnych blachownic oraz stężenie poprzeczne podłużnic (w połowie ich rozpiętości), wykonane z ceowników C180.

Zaplanowano modernizację nawierzchni kolejowej na przęsłach pod torem środkowym mostu. Po zdjęciu nawierzchni kolejowej mostu stwierdzono rozległe uszkodzenia korozyjne podłużnic oraz częściowo poprzecznic i elementów stężeń (Rys. 2 i 3). Podłużnice wraz z blachami uciągającymi wymieniono na nowe elementy, podobnie jak uszkodzone części stężeń. Poprzecznice naprawiono poprzez spawanie dodatkowych blach w miejscach lokalnych uszkodzeń korozyjnych. Dźwigary zachowały się ogólnie w zadowalającym stanie technicznym i nie potrzebowały naprawy (Rys. 4).

The railway track is supported on two stringers placed at 1.75 m between centres, connected to floor beams placed at 3.08 m between centres (Fig. 1 and 2). The floor beams are made of rolled steel sections. The stringers are I-beams of two types: NP 360 at supports (9.24 m long) and INP 380 at mid-span (6.16 m long). The floor beams are made of Peiner IP 500 I-beams. The bridge had a traditional open deck structure with the bridge sleepers resting directly on the top flanges of stringers. The bridge rigidity is ensured by U-frame with inclined knee bracing, horizontal X-bracings made of 70×70×10 mm angles in plane with the lower flanges of plate girders and stringer mid-span cross-brace of C180 channel section.

It was planned to renew the track structure on the spans under the middle track. Extensive corrosion damage was found under the removed track, affecting the stringers and partly also the floor beams and bracing elements (Fig. 2 and Fig. 3). The stringers, including the splice plates, have been replaced with new elements, the same as the damaged portions of bracings. On the other hand, the floor beams were repaired by welding on the repair steel plates over the corrosion hot spots. The girders have been generally in good conditions with no need of repair (Fig. 4).



a)



b)

Rys. 3. Corroded elements after sandblasting: a) a cross beam, b) a gusset plate in a stringer connection
Rys. 3. Skorodowane elementy po oczyszczeniu: a) poprzecznic, b) blacha węzłowa w połączeniu podłużnic



Fig. 4. General view of the bridge after beam floor repair
Rys. 4. Widok ogólny mostu po naprawie pomostu belkowego

3. SKŁAD CHEMICZNY I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE STALI

Demontaż podłużnic umożliwił uzyskanie materiału do badań właściwości stali dwóch z nich (Rys. 5). Próbkę do badań udarnościowych wykonano z blachy środników dwuteowników 360 i 380, a próbki do badań na rozciąganie z ich półek [12]. Spektrometryczna analiza chemiczna stali z poszczególnych typów podłużnic wykazała skład chemiczny podany w Tabl. 1. Zaprezentowano w niej skład chemiczny stali zgrzewnej i zlewnej w celach porównawczych. Stale tego gatunku były stosowane na konstrukcje budowlane w okresie budowy omawianego mostu [5-7]. Podano również skład chemiczny stosowanej w ostatnim okresie w mostownictwie w Polsce stali St3M według PN-89/H-84023/04 oraz współczesnej stali konstrukcyjnej niskostopowej S235 według EN-PN 10025-2. Z porównania składu chemicznego poszczególnych gatunków stali wynika, że konstrukcja mostu została wykonana ze stali zlewnej. Cechą charakterystyczną wczesnych stali zlewnych jest mała zawartość węgla. Stanowi to czynnik niekorzystny, ponieważ szybkość starzenia zwiększa się, gdy zawartość węgla jest mniejsza niż 0,10%. Śladowa jest również zawartość krzemu, a średnia zawartość fosforu wynosi 0,075% i jest większa od 0,05%. Stan ten powoduje gruboziarnistość stali i zwiększa jej kruchość.

Table 1. Chemical composition of steel
Tablica 1. Skład chemiczny stali

Kind of steel Rodzaj stali	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]	Al [%]
I 360	0.028	0.516	0.00	0.062	0.025	0.051	0.00	0.042	0.004
I 380	0.037	0.528	0.00	0.088	0.042	0.051	0.00	0.035	0.003
Puddled steel Stal zgrzewna	0.04÷ 0.30	traces / ślady ÷0.33	0.10÷0.33	0.02÷0.46	0.01÷0.06	–	–	–	–
Cast steel Stal zlewna	0.03÷ 0.35	0.04÷ 0.75	traces / ślady ÷0.18	0.004÷ 0.16	0.004÷0.09	0.11÷ 0.14	0.007÷0.014	0.03÷ 0.04	0.010 ÷0.020
Steel St3M Stal St3M	max 0.20	min 0.40	0.12÷0.30	max 0.050	max 0.050	–	max 0.30	max 0.30	max 0.02
Steel S235 Stal S235	max 0.17	max 1.40	–	max 0.025	max 0.025	max 0.55	–	–	–

Właściwości mechaniczne stali mostu określono na podstawie badań statycznego rozciągania próbek okrągłych, pięciokrotnych, o średnicy bazowej 10 mm (Tabl. 2 oraz Rys. 6-8). Z obu podłużnic wykonano po cztery próbki dla poniższych trzech grup o zróżnicowanej strukturze (takie

3. CHEMICAL COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL

Dismounting of the stringers was used as an opportunity to test the properties of steel on samples cut from two of them (Fig. 5). The test specimens were cut from the webs and flanges of the I-beams ref. 360 and 380, the former were used for impact testing and the latter for tensile testing [12]. The chemical composition of steel was determined by spectroscopic analysis and the results obtained for the respective stringers are given in Table 1. It compares the chemical compositions of puddled iron and cast steel. These are the two kinds of structural steel used in the building industry at the time of construction of the analysed bridge [5-7]. Moreover, it gives the chemical composition of St3M steel according to the Polish Standard PN-89/H-84023/04, which has been generally used in construction of steel bridges in Poland, and S235 steel - contemporary low-alloy steel according to EN-PN 10025-2. Comparing the chemical compositions of the different kinds of steel the authors have found that cast steel was the material used for the bridge construction. A characteristic feature of this kind of early steel is low content of carbon. With the content of carbon below 0.10% the rate of ageing increases, and thus it is considered as an unfavourable factor. The composition includes a trace amount of silicon and the average content of phosphorus is 0.075%, thus exceeding the threshold value of 0.05%. This situation results in a coarse-grain steel structure and increased its brittleness.

The mechanical properties of the bridge steel were determined through static tension test carried out on round fivefold specimens of 10 mm in diameter (Tabl. 2 and Fig. 6-8). Four specimens were obtained from each stringer, classified depending on the internal structure into

oznaczenie grup próbek jest stosowane w tablicach i na rysunkach):

- grupa *SS* to próbki z materiału w stanie aktualnym, czyli starzonym samorzutnie przez prawie 130 lat,
- grupa *WN* to próbki poddane wyżarzaniu normalizującemu w temperaturze 930°C przez jedną godzinę i studzone na powietrzu,
- grupa *WZ* to próbki wyżarzane zupełnie, podobnie jak próbki *WN*, w temperaturze 930°C przez jedną godzinę, lecz studzone razem z piecem.



Fig. 5. View of the samples from two stringers for testing
Rys. 5. Widok odcinków dwóch podłużnic do badań

Celem wyżarzania normalizującego jest całkowite przekryształizowanie i uzyskanie struktury jednorodnej i drobnoziarnistej, pozbawionej naprężeń własnych. Zabieg polepsza (w porównaniu z *WZ*) własności mechaniczne stali, szczególnie twardość i odporność na kruche pękanie [9, 10]. Określone parametry mechaniczne próbek *WN* są porównywalne z właściwościami stali w fazie dostawy, czyli z cechami stali z okresu budowy mostu [15-17]. Wyżarzanie zupełnie (*WZ*) jest w zasadzie zabiegiem hutniczym, któremu poddaje się półwyroby (pręty, odkuwki). Poddaje mu się również stale stopowe o małej prędkości krytycznej chłodzenia, które studzone na powietrzu mogą ulegać przemianom: perlitycznej, bainitycznej, a nawet martenzytycznej, co jednak spowodowałoby ich nadmierne utwardzenie i pogorszyło spawalność. Natomiast wyżarzaniu normalizującemu poddaje się stale węglowe oraz stopowe nisko- i średniowęglowe o większych krytycznych prędkościach chłodzenia [15].

the following three groups (these designations are consistently used in both, tables and figures):

- *SS* – raw specimens from the material which was aged naturally for almost 130 years,
- *WN* – specimens subjected to normalising treatment at the temperature of 930°C for one hour, followed by cooling in air,
- *WZ* – specimens subjected to full annealing at 930°C for one hour, the same as as specimens *WN*; except that after heating they are left in place to cool down at the same rate as the furnace.



Fig. 6. Steel specimen in tensile strength test
Rys. 6. Próbką stalowa w badaniu wytrzymałości na rozciąganie

The purpose of normalising (also known as annealing process) is re-crystallisation and obtaining steel with a homogenous, fine-grain structure in stress-free state. As it can be seen by comparison with *WZ* specimens, the treatment improves the mechanical properties of steel, including in particular hardness and fracture toughness [9, 10]. The specimens from *WN* group have certain properties comparable to that of steel as supplied, i.e. at the time of bridge construction [15-17]. Full annealing (*WZ*) is generally a mill process used for semi-processed products (bars, forgings). It is also used for different kind of alloy steel with low critical cooling rate, for which air cooling could result in bainite and pearlite, or even martensite transformation with unwelcome effect of increased hardness and worsened weldability. On the other hand, normalising is used for carbon steel, low-carbon and medium-carbon alloy steel featuring higher critical cooling rates [15].

Table 2. Mechanical properties of three series of steel specimens
 Tablica 2. Właściwości mechaniczne stali trzech grup próbek

Element	Size / Wymiar [mm]	Specimen / Próbką*)	E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Brinell hardness / Twardość Brinella		
								HB 5/750/15	$R_{eB}^{**)}$ [MPa]	R_{mB} [MPa]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I360	ϕ 10 $L=50$	SS	200	277.3	252.1	381.5	29	116	288.3	389.6
		WN	189	287.2	259.7	387.7	39	126	312.0	421.6
		WZ	182	277.3	258.2	391.8	36	125	308.7	417.2
I380	ϕ 10 $L=50$	SS	188	276.4	259.2	386.6	38	121	300.0	405.3
		WN	206	319.3	284.7	408.2	39	132	326.0	440.6
		WZ	185	305.1	275.1	398.6	35	131	323.8	437.6

Remarks / Uwagi:

*) average values from four specimens of every type (I-beam flanges with $t > 16$ mm) / wartości średnie z czterech próbek każdego rodzaju (półki dwuteowników o $t > 16$ mm)

**) R_{eB} for / dla $\alpha = \frac{R_{eH}}{R_m} = \frac{290}{392} = 0.74$ (average values from col. 5 & 7 / wartości średnie z kol. 5 i 7)

$R_{eH \min} = 251$ MPa (I 360); $R_{eH \min} = 266$ MPa (I 380) – SS
 $R_{eH \min} = 276$ MPa (I 360); $R_{eH \min} = 297$ MPa (I 380) – WN

Wykresy rozciągania trzech grup próbek stali z dwuteownika 360 przedstawiono na Rys. 7, a z dwuteownika 380 na Rys. 8. Średnie wyniki badań mechanicznych wszystkich 24 próbek podano w Tabl. 2. Wykresy rozciągania próbek z obu podłużnic to typowe wykresy rozciągania stali współczesnych gatunku S235. Na wykresach σ - ϵ występuje charakterystyczna półka plastyczna z pomierzonymi wartościami górnej granicy plastyczności R_{eH} (na Rys. 8 dla próbek SS I380 – od 266,4 do 283,8 MPa) i dolnej granicy plastyczności R_{eL} (próbki SS I380 – od 249,0 do 271,8 MPa).

W wyniku starzenia nie nastąpiło umocnienie się stali. Wprost przeciwnie, obniżyła się nieznacznie granica plastyczności i wytrzymałości w porównaniu do próbek WN średnio o 8,7 i 3,5% (Tabl. 2, kol. 5 i 7). Jednocześnie zmniejszyła się wydłużalność i twardość, średnio o 14% i 8,1% (Tabl. 2, kol. 8 i 9). Powyższe wyniki są sprzeczne z wynikami uzyskanymi przez autorów artykułu w dotychczasowych badaniach własnych, jak również z wynikami uzyskiwanymi przez większość autorów badających stal zlewną [5, 8].

Każdorazowo uzyskane parametry badanej stali (Tabl. 2) nie są mniejsze od wartości normowych dla stali mostowej St3M ($R_e \geq 240$ MPa, $R_m > 370$ MPa i $A_5 \geq 25\%$) i są około 15÷20% większe od proponowanych przez Międzynarodowy Związek Kolejowy UIC, który podaje poniższe wartości charakterystyczne [3]:

The tension test results of the three groups of specimens are presented as stress-strain curves in Fig. 7 for I-beam 360 and in Fig. 8 for I-beam 380. Table 2 presents the average results of mechanical tests on all the tested specimens (24). The stress-strain curves obtained for the specimens cut from the two stringers correspond to the curves typically obtained for the modern S235 steel. The curves in σ - ϵ graphs include the characteristic yield plateau with the measured higher yield point R_{eH} (in Fig. 8 for specimens SS I380 – between 266.4 and 283.8 MPa) and lower yield point R_{eL} (for specimens SS I380 – between 249.0 and 271.8 MPa).

Ageing has not increased the hardening of steel. On the contrary, the yield strength and ultimate strength are lower as compared to WN specimens on average by 8.7% and 3.5% respectively (Table 2, col. 5 and col. 7). Simultaneously, elongation and hardness decreased with ageing by 14 and 8.1% respectively (Table 2, col. 8 and col. 9). The above results do not agree neither with the results the authors have obtained in the earlier studies, nor with the findings reported by most researchers dealing with cast steel [5, 8].

In each case the test results (Table 2) meet the Polish standard requirements for St3M steel in case of steel bridges ($R_e \geq 240$ MPa, $R_m > 370$ MPa and $A_5 \geq 25\%$) and are by 15÷20% higher than the characteristic values proposed by UIC (International Union of Railways) [3]:

- granica plastyczności $R_{eH} = 220$ MPa,
- wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 320 \div 380$ MPa,
- współczynnik sprężystości podłużnej $E = 200\,000$ MPa.

Przyjmując według PN-82/S-10052 zwiększony o 5% współczynnik materiałowy $\gamma_s = 1,15$ ($R_e < 355$ MPa), otrzymuje się w przypadku stali podłużnic:

- wytrzymałość charakterystyczną $R_e = R_{eH \min} = 251$ MPa,
- wytrzymałość obliczeniową $R = 251/1,20 = 209$ MPa.

Według PN-EN 1993-2 wytrzymałość obliczeniowa wynosi $f_y = 251$ MPa.

- yield strength $R_{eH} = 220$ MPa,
- ultimate tensile strength $R_m = 320 \div 380$ MPa,
- modulus of longitudinal elasticity $E = 200\,000$ MPa.

Increasing the partial material safety factor by 5% to $\gamma_s = 1.15$ ($R_e < 355$ MPa) in accordance with PN-82/S-10052 the following values for the steel of stringers are obtained:

- characteristic strength of $R_e = R_{eH \min} = 251$ MPa,
- design strength of $R = 251/1.20 = 209$ MPa.

According to PN-EN 1993-2 the design strength is $f_y = 251$ MPa.

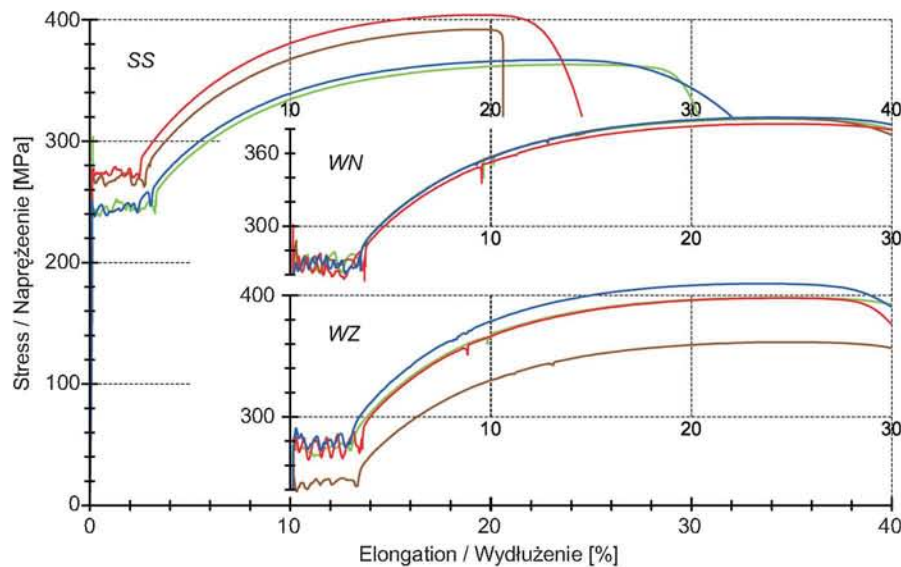


Fig. 7. Stress-strain curves of steel specimens from stringer I360
Rys. 7. Wykresy rozciągania próbek stali podłużnicy I360

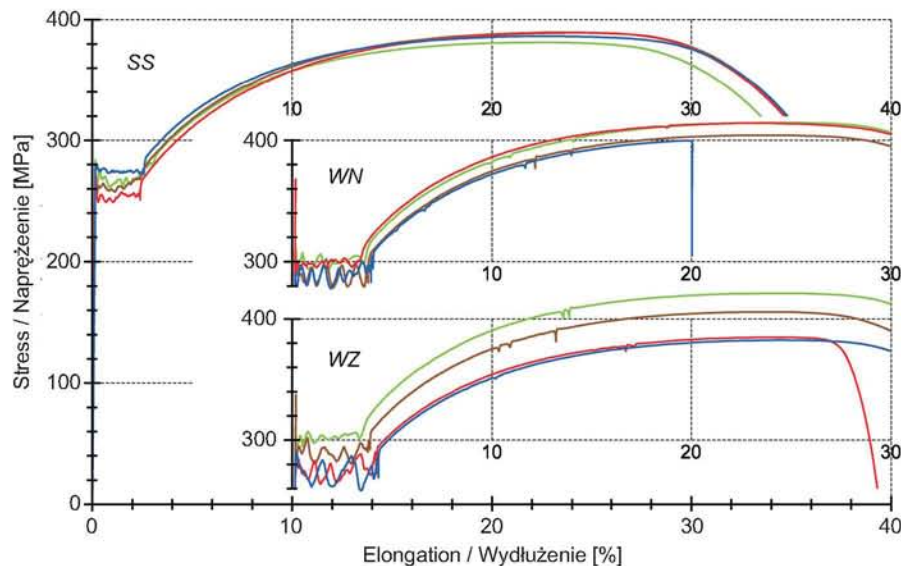


Fig. 8. Stress-strain curves of steel specimens from stringer I380
Rys. 8. Wykresy rozciągania próbek stali podłużnicy I380

Uzyskana wartość średnia modułu sprężystości stali (próbek *SS*) $E = 194\ 000$ MPa jest porównywalna z wartością otrzymaną z badań próbek *WN*, dla których $E = 197\ 000$ MPa. Wartości te są nieznacznie mniejsze od wartości zalecanej przez UIC, odpowiednio o 3,1 i 1,5%. W praktyce, przy obliczeniach różnice wartości modułu sprężystości wynoszące 5÷10% z zasady pomija się, gdyż taka niedokładność nie prowadzi do większych błędów [11].

Wykorzystując próbki do badań chemicznych, przeprowadzono pomiar twardości stali metodą Brinella. Badania wykonano twardościomierzem typ B3Cs w tzw. warunkach standardowych [12]. Dla wyznaczonych wartości HB określono wytrzymałości na rozciąganie R_{mB} (kol. 11) i przy stosunku $R_{eB}/R_{mB} = 0,74$ wartości granicy plastyczności R_{eB} (kol. 10). Łatwo zauważyć, że obliczone średnie wartości R_{eB} i R_{mB} (kol. 10 i 11) dla poszczególnych grup próbek są większe od wartości R_{eH} i R_m (kol. 5 i 7) od 2,1 do 11,3%. W przypadku próbek *SS* różnice te wynoszą 4,0 i 2,1% (I360) oraz 8,5 i 4,8% (I380), a dla próbek *WN* odpowiednio 8,6 i 8,7% (I360) oraz 2,1 i 7,9% (I380).

Ocenę zachowania się stali z podłużnic mostu w wypadku ewentualnego występowania warunków sprzyjających kruchemu pękaniu, spowodowanemu obecnością karbu i odkształceniami o dużej szybkości, powstałymi w wyniku udarowego działania siły, przeprowadzono na podstawie łamania próbek udarnościowych. Wyniki z badań pracy łamania $KV(T)$ 90 próbek Charpy'ego w przedziale temperatur $T = (-20$ do $+20)^\circ\text{C}$ przedstawiono w Tabl. 3 i na Rys. 9. Podobnie jak w badaniach na rozciąganie, również pracę łamania $KV(T)$ określono dla trzech grup próbek (po 30 próbek w danej grupie):

- starzonych samorzutnie – *SS*, czyli bez dodatkowych zabiegów,
- wyżarzanych normalizująco – *WN*,
- wyżarzanych zupełnie – *WZ*.

Badania te umożliwiają oszacowanie wpływu okresu eksploatacji mostu na zmianę parametrów odporności na kruche pęknięcie w czasie. Badana stal wykazała bardzo małą odporność na kruche pęknięcie. Uzyskana praca łamania $KV = 5,5$ i $6,3$ J w temperaturze 0°C stanowi jedynie 20,4% i 23,3% wymaganej normowej wartości 27 J dla stali nowych konstrukcji mostowych. Należy zaznaczyć, że praca łamania stali w fazie dostawy (próbki *WN*) w okresie budowy mostu była wystarczająca i w temperaturze 0°C wynosiła $KV = 39,6$ oraz $37,7$ J, a temperatura jej przejścia w stan kruchy (Rys. 9) była równa -12°C i -6°C . Określony średni „wskaźnik starzenia” W_s , równoważny stosunkowi udarności po zesterzeniu do udarności stali niestarzonej obu

E -modulus of $194\ 000$ MPa obtained for *SS* specimens is comparable to the value obtained for *WN* specimens ($197\ 000$ MPa). These values are slightly lower than the value recommended by UIC, by 3.1% and 1.5% respectively. In common practice differences in the value of E -modulus in the order of 5÷10% are generally ignored because such inaccuracy does not lead to bigger errors [11].

Hardness was determined on the specimens prepared for chemical analysis using Brinell hardness tester. The tests were carried out in normal conditions [12], using B3Cs hardness tester. The measured HB values were used to determine the tensile strength R_{mB} (col. 11) and the yield point R_{eB} (col. 10) for the ratio of $R_{eB}/R_{mB} = 0.74$. As it can be seen the calculated average values of R_{eB} and R_{mB} (col. 10 and 11) for the respective groups of specimens are higher than R_{eH} and R_m (col. 5 and 7) by 2.1-11.3%. For *SS* group these differences are 4.0/2.1% (I360) and 8.5/4.8% (I380), and for *WN* group respectively: 8.6/8.7% (I360) and 2.1/7.9% (I380).

The performance of steel in stringers under conditions promoting brittle fracture, i.e. notching and high strain rate caused by impact force, was determined on notched impact test specimens. The values of absorbed energy in the Charpy impact test $KV(T)$ for 90 specimens in the temperature range $T = (-20$ to $+20)^\circ\text{C}$ are presented in Table 3 and in Fig. 9. Similarly to the tensile test also the absorbed energy $KV(T)$ was determined for the three groups of specimens (30 in each group):

- naturally aged – *SS* without any additional treatment,
- normalised – *WN*,
- fully annealed – *WZ*.

These tests enable estimating the effect of the years in service of the bridge on the fracture toughness of steel as a function of time. The tested steel exhibited a very low fracture toughness. The values of impact energy $KV = 5.5$ and 6.3 J at 0°C constitutes only 20.4% and 23.3% of the standard requirement of 27 J in case of steel used for constructing new bridges. Note that when supplied to the construction site the steel had the required value of impact energy of $KV = 39.6$ and 37.7 J at 0°C with ductile-brittle transition temperature of -12°C and -6°C , as determined on *WN* specimens (Fig. 9). The ageing factor W_s was calculated as the ratio between impact toughness of aged and unaged steels of both stringers (*WN* group), having the following values: 0.36 at -20°C , 0.15 at 0°C and 0.12 at $+20^\circ\text{C}$. While hardly ever obtained on structural steel [6], such values are typical of early cast steels [3, 5, 9, 10].

podłużnic (próbki *WN*), w temperaturze -20°C wynosi 0,36, a w temperaturze 0°C i $+20^{\circ}\text{C}$: 0,15 i 0,12. Wartości takie, w odniesieniu do stali budowlanej, uzyskiwane są jedynie w skrajnych przypadkach [6], natomiast stanowią regułę we wczesnych stalach zlewnych [3, 5, 9, 10].

Table 3. The results of impact energy tests of three series of Charpy V specimens

Tablica 3. Wyniki badań pracy łamania trzech grup próbek Charpy V

I NP 360						I NP 380					
Specimen / Próbką	T [°C]					Specimen / Próbką	T [°C]				
	-20	-10	±0	+10	+20		-20	-10	±0	+10	+20
SS	3.7	4.3	5.2	7.3	10.2	SS	3.2	5.6	5.8	8.1	11.3
	3.9	4.7	5.3	8.1	11.5		4.1	5.8	6.4	9.3	14.9
	4.2	5.0	6.0	9.2	14.4		4.2	6.1	6.8	9.7	15.7
Average / Średnia	3.9	4.7	5.5	8.2	12.0	Average / Średnia	3.8	5.8	6.3	9.0	14.0
<i>WN</i>	8.2	29.9	36.0	55.5	106.5	<i>WN</i>	10.2	19.1	31.4	60.6	104.3
	8.5	33.5	36.7	59.6	119.1		13.0	21.7	33.7	64.5	106.6
	8.8	35.2	46.0	67.0	123.1		14.5	22.5	48.0	71.0	111.2
Average / Średnia	8.5	32.9	39.6	60.7	116.2	Average / Średnia	12.6	21.1	37.7	65.4	107.4
<i>WZ</i>	4.4	7.5	8.7	11.4	15.1	<i>WZ</i>	4.6	8.6	11.3	12.8	16.4
	4.5	8.1	9.6	14.1	16.1		4.8	9.1	11.4	13.4	18.2
	4.9	8.7	11.2	15.3	17.4		5.3	10.2	12.0	16.1	21.0
Average / Średnia	4.6	8.1	9.8	13.6	16.2	Average / Średnia	4.9	9.3	11.6	14.1	18.5

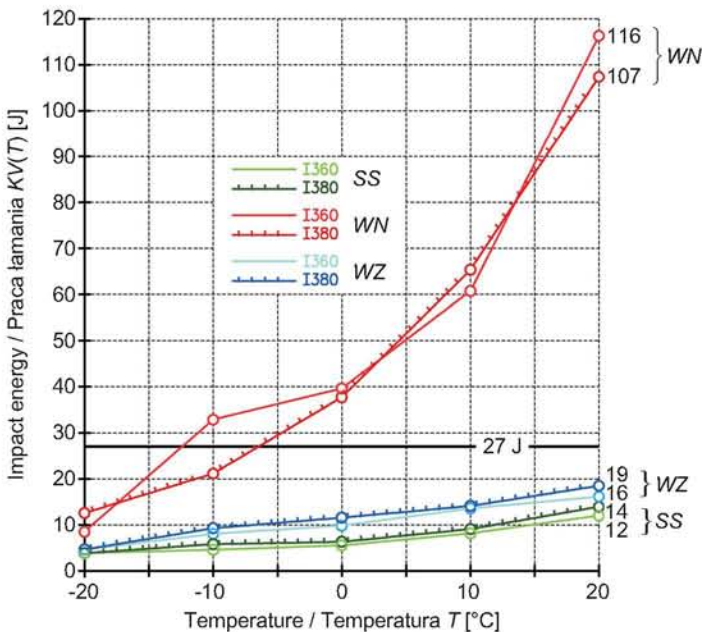


Fig. 9. Impact energy of three series of specimens from two stringers – I360 and I380

Rys. 9. Wyniki badań pracy łamania trzech grup próbek ze stali dwóch podłużnic – I360 i I380

4. EVALUATION OF WELDABILITY

The metallurgical and mechanical weldability of steel was determined on the basis of the test results [18, 19]. Below are the values of the relevant coefficients [2, 6, 9, 14], determined for steel I360 and I380 (the latter are given in brackets):

- carbon equivalent value (CEV):

$$C_e = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15} = 0.12 \text{ (0.13)}, \quad (1)$$

- hot cracking resistance:

$$HSC = 100 \left(S + P + \frac{\text{Si}}{25} + \frac{\text{Ni}}{100} \right) + \frac{C}{3\text{Mn} + \text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}} = 1.58 \text{ (3.04)} < 4.0, \quad (2)$$

- carbon equivalent for cold cracking:

$$C'_e = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{P}{2} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{Ni}}{15} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{Cr} + \text{V}}{5} + 0.0024t = 0.20 \text{ (0.22)} < 0.4, \quad (3)$$

where: $t = 20 \text{ mm}$ – thickness of flange of the tested I-beam,

4. OCENA SPAWALNOŚCI STALI

Na podstawie przeprowadzonych badań oszacowano spawalność metalurgiczną i konstrukcyjną stali [18, 19]. W tym celu określono podane niżej współczynniki [2, 6, 9, 14], których wartości zapisane bez nawiasów dotyczą stali I360, a w nawiasach stali I380:

- równoważnik węgla:

$$C'_e = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15} = 0,12 \text{ (0,13)}, \quad (1)$$

- wskaźnik odporności materiału na pękanie gorące:

$$HSC = 100 \left(S + P + \frac{\text{Si}}{25} + \frac{\text{Ni}}{100} \right) + \frac{C}{3\text{Mn} + \text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}} = 1,58 \text{ (3,04)} < 4,0, \quad (2)$$

- ekwiwalent węgla z uwagi na pękanie zimne:

$$C'_e = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{P}{2} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{Ni}}{15} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{Cr} + \text{V}}{5} + 0,0024t = 0,20 \text{ (0,22)} < 0,4, \quad (3)$$

gdzie: $t = 20$ mm – grubość półki badanego dwuteownika,

- twardość strefy wpływu ciepła:

$$HV_{\max} = 1200C'_e - 200 = -56 \text{ (-44)} \text{ HV} < 300 \text{ HV}, \quad (4)$$

$$HV_{\max} = 90 + 1050C + 47\text{Si} + 75\text{Mn} + 30\text{Ni} + 31\text{Cr} = 159 \text{ (170)} \text{ HV} < 350 \text{ HV}. \quad (5)$$

Dodatkowo obliczono szybkość chłodzenia podczas spawania w temperaturze początkowej przemiany martenzytycznej przy $T = 450^\circ\text{C}$, uzyskując wartości $2,8 \text{ (2,8)}^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, które są znacznie mniejsze niż $10^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski. Pomost belkowy mostu został wykonany ze stali zlewnej, nieuspokojonej z uwagi na zerowe zawartości krzemu i o strukturze gruboziarnistej, gdyż zawartość fosforu $P = 0,062$ i $0,088\%$ przekracza znacznie ilość graniczną $0,05\%$. Fosfor zwiększa wytrzymałość, granicę plastyczności i twardość, zmniejsza natomiast wydłużenie i udarność. Autorzy artykułu tłumaczą uzyskane parametry z badań mechanicznych i udarnościowych (Tabl. 2 i 3) właśnie zawartością fosforu, w ilości średniej $0,075\%$. Wykazane tam właściwości mechaniczne stali próbek *SS* oraz próbek normalizowanych *WN* i wyżarzanych *WZ* są porównywalne z właściwościami stali St3M. Oznacza to, że nie doszło do znacznych

- heat affected zone (HAZ) hardness:

$$HV_{\max} = 1200C'_e - 200 = -56 \text{ (-44)} \text{ HV} < 300 \text{ HV}, \quad (4)$$

$$HV_{\max} = 90 + 1050C + 47\text{Si} + 75\text{Mn} + 30\text{Ni} + 31\text{Cr} = 159 \text{ (170)} \text{ HV} < 350 \text{ HV}. \quad (5)$$

Additionally, cooling rate was calculated for welding at the initial martensitic transformation temperature of $T = 450^\circ\text{C}$. The obtained value was $2.8 \text{ (2.8)}^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ which is much lower than $10^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

5. CONCLUSIONS

The results of the tests carried out under this research allow the authors to withdraw the following conclusions. The bridge floor was made of rimmed cast steel as indicated by zero silicon content and with coarse-grain structure, since the contents of phosphorus of 0.062% and 0.088% are much above the limit of 0.05% . Phosphorus increases the ultimate yield strength, yield point and hardness of steel while affecting the elongation to break and impact toughness. It is phosphorus at the average content of 0.075% that is believed to be responsible for the values of mechanical and impact test parameters (as presented in Tables 2 and 3). The mechanical properties of steel determined on specimens of the three groups: *SS* (naturally aged), *WN* (normalised) and *WZ* (fully annealed) are comparable to the properties of contemporary steel St3M. This means that bridge operation has not significantly affected the mechanical properties of the steel in the stringers.

The mechanical properties of steel in stringers, determined on the basis of measured Brinell hardness, as recommended by the Polish standard PN-H-04357:1993, should be treated as approximate. This said, one should note a high level of correspondence between the values of R_{eB} and R_{mB} on the one hand and R_{eH} and R_m on the other, as obtained in the static tension tests. There is only 8.7% maximum difference between the average values for groups *SS* and *WN* (Table 2). Taking account of the deck structure it can be assumed with high probability that such steel was used also to fabricate the main girders.

Ageing resulted in so-called precipitation [10, 11] – a specific type of crystallization of steel increasing hardness and affecting its impact toughness. This leads to embrittlement of the material (Tabl. 3). The fracture resistance was determined on naturally aged, normalised and fully annealed steel specimens showing considerable deterioration of the material. Low value of Charpy V-notch impact energy KV is considered normal for cast steel and

ujemnych zmian właściwości mechanicznych stali podłużnic w wyniku eksploatacji mostu.

Właściwości mechaniczne stali podłużnic określone na podstawie pomiarów twardości Brinella, zgodnie z zaleceniem normy PN-H-04357:1993, trzeba traktować jako przybliżone. Tym niemniej należy zauważyć dużą zgodność wartości R_{eB} i R_{mB} z wartościami R_{eH} i R_m , uzyskanymi ze statycznego rozciągania próbek. Maksymalna różnica średnich wartości dla próbek *SS* i *WN* wynosi jedynie 8,7% (Tabl. 2). Ze względu na formę konstrukcji przęsła można oszacować z dużym prawdopodobieństwem, że i dźwigary główne są wykonane z podobnej stali.

Pod wpływem starzenia wystąpiła tzw. „precypitacja” [10, 11], tj. specjalny rodzaj krystalizacji powodującej wzrost twardości i spadek udarność. Jest to zjawisko prowadzące do kruchości materiału (Tabl. 3). Przeprowadzone próby odporności na kruche pęknięcie w stanie normalnym oraz po wyżarzaniu normalizacyjnym i po wyżarzaniu pełnym wykazały dużą degradację stali. Niska wartość pracy łamania *KV* stali zlewnej w badaniach na próbkach Charpy’ego z karbem ostrym V jest zjawiskiem naturalnym i nie wskazuje na możliwość wystąpienia kruchych pęknięć. Dokładniejsze badania udarność stali metodami mechaniki pęknięcia wskazują, że stale zlewne są z reguły odporne na kruche pęknięcie [13, 20, 21].

Wykorzystując wyniki spektrometrycznej analizy chemicznej stali oszacowano wskaźniki określające jej spawalność. Obliczone wartości wszystkich wskaźników są mniejsze od literaturowych wartości krytycznych, co pozwala stwierdzić, że badana stal jest spawalna bez ograniczeń. Fakt ten umożliwił bezpieczne wykonanie części robót naprawczych pomostu z zastosowaniem spawania.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] PN-EN 1993. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych
- [2] Wichtowski B.: Wytrzymałość zmęczeniowa spawanych złączy doczołowych w stalowych mostach kolejowych. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, **572**, Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2002
- [3] Madaj A., Wołowicki W.: Budowa i utrzymanie mostów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1995
- [4] Bień J.: Mosty kolejowe - uszkodzenia, awarie, katastrofy. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin - Międzyzdroje, 2009, 45-62
- [5] Madaj A., Skarżewski J.: Ocena właściwości stali zgrzewnych i wczesnych stali zlewnych w konstrukcjach mostowych. Inżynieria i Budownictwo, **XLII**, 2, 1986, 71-75
- [6] Wichtowski B., Woźniak Z.: Właściwości stali zlewnej kratownicowego mostu kolejowego po 122 latach eksploatacji. Inżynieria i Budownictwo, **LXIX**, 4, 2006, 212-214
- [7] Hołowaty J., Wichtowski B.: Properties of structural steel used in early railway bridges. Structural Engineering International, **23**, 4, 2013, 512-518
- [8] Brandes K.: Eigenschaften alter Eisen und Stähle und Ihre adäquate Materialprüfung und Bewertung. Bau-technik, **85**, 6, 2008, 394-406
- [9] Wichtowski B., Hołowaty J.: Analiza właściwości materiałowych i spawalności stali zlewnej mostów kolejowych. Inżynieria i Budownictwo, **LXIX**, 5, 2013, 247-251
- [10] Wichtowski B., Hołowaty J.: Badania udarnośćowe stali zlewnej mostów kolejowych. Inżynieria i Budownictwo, **LXX**, 1, 2014, 28-32
- [11] Wichtowski B.: Wpływ starzenia stali na jej wytrzymałość zmęczeniową. Inżynieria i Budownictwo, **LXV**, 5, 2009, 286-288
- [12] Wichtowski B., Hołowaty J.: An analysis of the properties of structural steel in a railway bridge with 123 years' service life. The 12th International Conference on Metal Structures – Progress in steel and composite structures. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2011, 174-175
- [13] Kühn B., Lukić M., Nussbaumer A. i inni: Assessment of existing steel structures: recommendations for estimation of remaining fatigue life. JRC-ECCS, Luxembourg, 2008
- [14] Hołowaty J., Wichtowski B.: Problemy spawalnicze przy modernizacji starych mostów kolejowych. Przegląd Spawalnictwa, **87**, 5, 2015, 45-51

does not indicate susceptibility to brittle fracture. Cast steels have been found to represent generally good fracture resistance as determined with more detailed fracture mechanics methods [13, 20, 21].

The results of spectrometric analysis of the tested steel were used to determine values defining its weldability. The obtained values were lower than the critical values given in the literature which allows for the conclusion that the tested steel is weldable without any conditions. This ensured safety of repair of the pre-defined parts of the bridge by welding.

- [15] *Prowans S.*: Metaloznawstwo. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 1973
- [16] *Haiman K., Konat Ł., Pękalski G., Rabięga J.*: Badania udarności i fraktografia przelomów jako kryteria oceny stanu degradacji stali mostowej. Badania materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2004, 353-362
- [17] *Ambroziak A., Pękalski G., Rabięga J.*: Propozycje metod oceny stanu degradacji konstrukcji mostowych z przelomu XIX i XX wieku. Wrocławskie Dni Mostowe. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2008, 277-286
- [18] *Tasak E., Ziewiec A.*: Spawalność materiałów konstrukcyjnych. Tom 1: Spawalność stali. Wydawnictwo JAK, Kraków, 2009
- [19] *Blicharski M.*: Inżynieria materiałowa – stal. WNT, Warszawa, 2011
- [20] *Sieber L., Stroetmann R.*: The tendency to brittle failure of old steel structures. The 7th European Conference on Steel and Composite Structures – Eurosteel 2014 – Research, design and construction. ECCS, Brussels, 2014, 915-916
- [21] *Nussbaumer A., Borges L., Davaine L.*: Fatigue design of steel and composite structures. Wiley, Berlin, 2011